

DMPP 对菜地土壤氮素径流损失的影响

俞巧钢¹, 符建荣¹, 马军伟¹, 叶静¹, 叶雪珠²

(1. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2. 浙江省农业科学院农产品质量标准研究所, 杭州 310021)

摘要: 利用模拟降雨试验, 研究了尿素添加 1% 新型硝化抑制剂 3, 4-二甲基吡唑磷酸盐(3, 4-dimethyl pyrazole phosphate, DMPP) 对菜地土壤氮素径流损失的影响. 结果表明, 添加 DMPP 抑制剂于尿素, 3 次模拟降雨地表径流液中铵态氮含量分别是常规尿素处理的 1.42、2.82 和 1.95 倍, 铵态氮径流损失有所增加; 使用硝化抑制剂 DMPP, 与常规尿素相比, 3 次模拟降雨地表径流液中硝态氮含量分别减少 70.2%、59.7% 和 52.1%, 亚硝态氮含量分别减少 98.7%、90.6% 和 85.6%, 可显著降低硝态氮和亚硝态氮的径流损失, 尤其是亚硝态氮的径流损失接近于不施氮处理; 常规尿素添加 1% 的 DMPP 抑制剂后, 可减少 39.0% ~ 44.8% 的无机氮进入地表水体, 明显降低氮素径流迁移损失. 使用 DMPP 抑制剂可减轻氮素向地表水体迁移的风险, 具有显著的生态效益.

关键词: DMPP; 氮素损失; 水环境; 尿素

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0870-05

Effect of DMPP on Inorganic Nitrogen Runoff Loss from Vegetable Soil

YU Qiao-gang¹, FU Jian-rong¹, MA Jun-wei¹, YE Jing¹, YE Xue-zhu²

(1. Institute of Environmental Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. Institute of Quality and Standard for Agro-Products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: The effect of urea with 1% 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate (DMPP) on inorganic nitrogen runoff loss from agriculture field was determined in an undisturbed vegetable soil by using the simulated artificial rainfall method. The results show that, during the three simulated artificial rainfall period, the ammonium nitrogen content in the runoff water is increased 1.42, 2.82 and 1.95 times with the DMPP application treatment compared to regular urea treatment, respectively. In the urea with DMPP addition treatment, the nitrate nitrogen content is decreased 70.2%, 59.7% and 52.1% in the three simulated artificial rainfall runoff water, respectively. The nitrite nitrogen content is also decreased 98.7%, 90.6% and 85.6% in the three simulated artificial rainfall runoff water, respectively. The nitrate nitrogen and nitrite nitrogen runoff loss are greatly declined with the DMPP addition in the urea. Especially the nitrite nitrogen is in a significant low level and is near to the treatment with no fertilizer application. The inorganic nitrogen runoff loss is declined by 39.0% to 44.8% in the urea with DMPP addition treatment. So DMPP could be used as an effective nitrification inhibitor to control the soil ammonium oxidation, decline the nitrogen runoff loss, lower the nitrogen transformation risk to the waterbody and be beneficial for the ecological environment.

Key words: 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate (DMPP); nitrogen runoff loss; water environment; urea

施入农田中的氮肥, 当季被作物利用的仅有 30% ~ 40%, 其余的则通过氨挥发、硝化-反硝化、渗漏和径流等多种途径损失^[1,2]. 因此, 农业生产中氮肥大量施用而造成的环境污染问题^[3~5], 已日益受到人们的广泛关注, 成为目前农业非点源污染研究中的热点^[6,7]. 其中蔬菜由于种植效益高, 超高量施用氮肥的现象十分普遍, 为普通大田作物的数倍甚至数十倍, 成为水质恶化的主要潜在威胁, 尤其是加速了氮素敏感区域水体的富营养化^[2,8,9]. 国际上始终重视对各种生化抑制剂的研究, 以图通过抑制土壤微生物及其酶的活性, 调控土壤氮素迁移转化的形态, 达到减少氮素损失对水环境污染, 提高氮肥利用率的目的^[10,11].

硝态氮是农田氮素向水体迁移输出的主要形态之一^[5,7,12], 控制或延缓铵态氮向硝态氮的转化有助

于减少土壤氮素的径流损失^[11,13,14]. 3, 4-二甲基吡唑磷酸盐(3, 4-dimethyl pyrazole phosphate, DMPP) 是一种近年来发现的新型硝化抑制剂, 在提高氮肥利用率和减少环境污染方面的作用非常明显, 效果优于以往的同类产品^[15~25]. 但目前其对水环境影响的相关研究不多. 本研究以新型硝化抑制剂 DMPP 及常规氮肥尿素为材料, 利用模拟降雨方法, 探究新型硝化抑制剂 DMPP 对土壤氮素径流迁移输出的影响, 以期减少蔬菜地土壤氮素径流损失和防治水环境污染提供科学依据.

收稿日期: 2008-04-01; 修订日期: 2008-06-11
基金项目: 国际科技合作项目(2006DFA92920); 浙江省科技计划项目(2007C14027)
作者简介: 俞巧钢(1973 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水土环境污染控制, E-mail: yqganghzj@sina.com

1 材料与方法

1.1 试验材料及方法

试验采用原状土盆栽青菜,结合模拟降雨的方法进行研究.原状土采用长、宽、高分别为 60 cm、40 cm 和 15 cm 土块.取土样时先在土块四边挖开垂直切面,然后在 15 cm 深处以薄铁板逐渐平行缓慢推入,尽量保持土壤的原有结构,将其置入预先准备好的试验槽中.为了防止降雨时短流出现,用 0~15 cm 层土壤拌成的泥浆弥合土块与槽之间的缝隙,并且在槽四周加 20 cm 高的塑料挡板,防止雨水和泥沙

溅出.同时在试验槽一侧紧贴土块表面处设置出水口,由直径 1 cm 的 PVC 管导出表面径流液,接入径流液收集桶中.

试验所用土块为嘉兴地区菜地土壤青紫泥,质地为粘土(表 1).采用称重法加水至田间持水量,使各土块含水量保持一致,稳定 1 周后移栽青菜幼苗.待青菜成活后,进行如下处理:不施肥(CK);常规尿素(Urea);添加量为尿素氮量 1% DMPP 的尿素(DMPP).尿素施用量(纯氮)为 150 kg•hm⁻²,肥料均匀施入 0~4 cm 层的土壤,各处理重复 3 次.

1.2 水样采集与分析方法

表 1 土壤基本理化性状

Table 1 Some physical and chemical properties of tested soil								
指标	有机碳/g•kg ⁻¹	全氮/g•kg ⁻¹	C/N	全磷/g•kg ⁻¹	CEC/cmole•kg ⁻¹	粘粒/%	粉粒/%	砂粒/%
青紫泥	23.1	2.4	9.61	0.928	18.25	46.4	42.1	11.5

模拟降雨系统主要由供水系统、降雨强度控制系统和模拟降雨机 3 部分组成^[26],其降雨面积为 2 m²,调试结果表明最佳降雨强度模拟范围为 30~100 mm•h⁻¹.蔬菜生长期,进行 3 次人工模拟降雨,采用降雨强度 60 mm•h⁻¹,每次降雨历时 45 min (不含产流时间),分别在施肥后的第 10、20 和 30 d 进行.径流出现后,分别在 0~5、5~15、15~25、25~35 及 35~45 min 时段内收集径流液.将各时段收集的径流液分别充分摇匀后采集不同时段径流液样品.最后把不同时段收集的全部径流液混合摇匀,采取整个降雨过程的混合径流液样品.降雨过程中采集的径流液经过滤后,用奈氏试剂比色法测定铵态氮,紫外分光光度法测定硝态氮,盐酸萘乙二胺络合显色法测定亚硝态氮.

程不断进行,降低了土壤铵态氮浓度有关.

施肥处理径流液铵态氮浓度明显增加(图 1).不施肥的处理,在 10、20 和 30 d 时,其浓度分别在 0.58~0.43、0.38~0.11 和 0.24~0.09 mg•L⁻¹ 范围.常规尿素施用后,3 次降雨径流液中铵态氮的含量分别达 3.90~1.40、1.08~0.27 和 0.86~0.16 mg•L⁻¹,径流液中铵态氮含量增加显著.DMPP 抑制

2 结果与讨论

2.1 DMPP 对土壤铵态氮径流损失的动态影响

尿素施入土壤后,在脲酶作用下水解为铵态氮,之后伴随着土壤中硝化过程的发生其浓度逐渐下降,同时积累较高的亚硝态氮含量.图 1 是土壤中铵态氮径流损失的动态变化,3 次降雨过程中,各处理的径流均表现为产流开始后径流液铵态氮起始浓度较高,之后随着降雨过程的进行,铵态氮浓度发生逐渐下降的趋势.对相同处理在 10、20 和 30 d 的降雨径流液中铵态氮浓度作纵向比较发现,径流液铵态氮浓度随降雨间隔时间的延长,相同处理所对应同一时段内铵态氮的浓度变化表现为降低的趋势,其原因与作物对土壤铵态氮的不断吸收及土壤硝化过

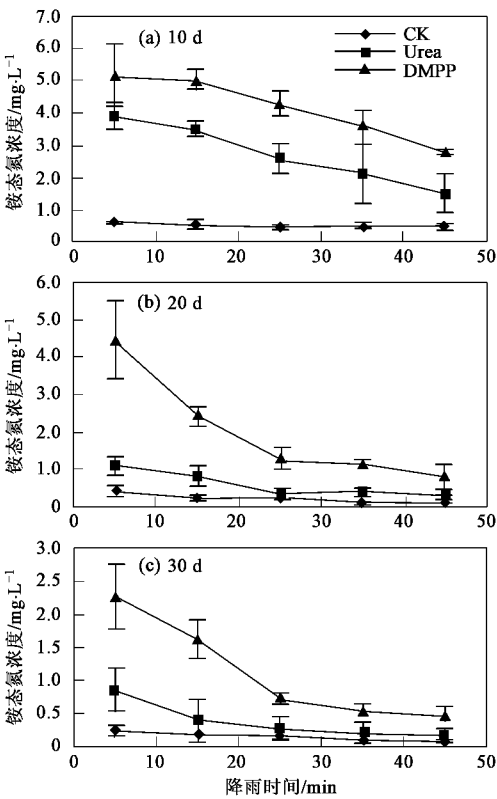


图 1 DMPP 对土壤铵态氮径流损失的动态影响
Fig.1 Effect of DMPP on ammonium-N runoff loss

剂可抑制土壤氮氧化反应的发生,维持土壤较高的铵态氮含量.与常规尿素相比,尿素添加 DMPP 后,径流液中铵态氮含量有一定程度增加,3 次降雨铵态氮的含量变化范围分别为 5.18 ~ 2.75、2.59 ~ 0.79 和 1.70 ~ 0.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.由于青紫泥土壤有较高的 CEC 值,土壤胶体颗粒对铵态氮有强烈的固持作用,使径流液中铵态氮浓度的增加维持在一定水平.

2.2 DMPP 对土壤硝态氮径流损失的动态影响

硝态氮难以为土壤矿物所固持,在雨水作用下极易发生迁移,是农田土壤氮素径流损失的主要形式之一.从图 2 可以看出,在第 1 次模拟降雨的过程中,常规尿素处理径流液中硝态氮的浓度在 25 min 内下降较快,在第 5 和 25 min 时分别为 7.64 和 4.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后至 45 min 时降为 3.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.添加 DMPP 的尿素处理,径流液中硝态氮的浓度低于不施肥处理,在降雨 25 min 内同样下降较快,在第 5 和 25 min 时分别为 3.11 和 1.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与常规尿素相比可分别使硝态氮浓度下降 59.3% 和 65.6%.第 20 和 30 d 的降雨结果与第 10 d 相似,常规尿素处理径流液的硝态氮在前 15 min 内较高,在 5 ~ 15 min 内的浓度分别为 10.28 ~ 4.68 和 6.77 ~ 3.41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后至 45 min 时分别降为 3.74 和 3.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.而第 20 和 30 d 的降雨,在第 5 min 时 DMPP 处理径流液的硝态氮仅为 2.68 和 3.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与

常规尿素处理相比,硝态氮浓度分别下降 73.9% 和 49.3%, 15 min 时径流液硝态氮的浓度降为 1.98 和 1.71 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远低于常规尿素处理,与对照不施肥的水平相近.这表明,DMPP 在 30 d 内能有效抑制土壤氮素氮氧化反应发生,抑制土壤硝态氮的径流损失,从而减少水体硝态氮污染.第 10 d 降雨时,DMPP 处理径流液中硝态氮的浓度低于不施肥处理,其原因可能是不施肥处理在土壤氮素自身矿化进程的作用下,土壤铵态氮可经硝化作用不断产生少量的硝态氮;而添加 DMPP 抑制剂的尿素,由于抑制剂在施用后早期可显著阻碍硝化反应进程,土壤铵态氮难以硝化形成硝态氮,可使添加 DMPP 处理土壤硝态氮浓度低于不施肥处理^[21,22].

2.3 DMPP 对土壤亚硝态氮径流损失的动态影响

尿素水解形成的铵态氮,在土壤亚硝化菌属的作用下氧化为亚硝态氮,此后在硝化细菌的作用下进一步转化为硝态氮.伴随着硝化作用的发生,土壤中亚硝态氮的含量会有所积累,而亚硝态氮不能被土壤矿物颗粒所吸附固定,极易随水流发生迁移损失,对水环境有潜在的污染风险.从图 3 可知,在第 10 d 模拟降雨中,常规尿素处理径流液亚硝态氮含量较高,整个降雨历时阶段其浓度表现为下降趋势,从 1.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 变化为 0.95 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;添加 DMPP 的尿素处理,整个降雨历时阶段亚硝态氮的浓度变化不明显,降雨开始和降雨结束时分别为 0.04 和 0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.与常规尿素相比,添加 1% 的 DMPP 可使亚硝态氮在降雨产流开始和结束后分别下降 98.0% 和 98.9%,极显著降低亚硝态氮的径流损失,与不施肥处理相近.第 20 和 30 d 的模拟降雨结果与第 10 d 相似.

2.4 径流液中无机氮形态及含量分析

径流液中不同氮素的形态及含量见表 2.从中可见,在第 10 d 降雨时,不施肥处理径流液中的氮素以硝态氮为主,其含量是铵态氮的 4 倍左右,亚硝态氮占有的比例极低.常规尿素处理的径流液中,以铵态氮和硝态氮为主,其中硝态氮的含量是铵态氮 1.66 倍,亚硝态氮也占有较大的比例,为无机氮总量的 15.7%.DMPP 尿素处理的径流液中,以铵态氮和硝态氮为主,其中铵态氮的含量是硝态氮的 2.88 倍,亚硝态氮占有的比例与不施肥处理相近.在第 20 d 降雨时,不施肥处理径流液中的氮素仍以硝态氮为主,其含量是铵态氮的 8.5 倍.常规尿素处理的径流液中,以硝态氮为主,其次是亚硝态氮和铵态氮,与第 1 次降雨相比,硝态氮占无机氮的比例有所

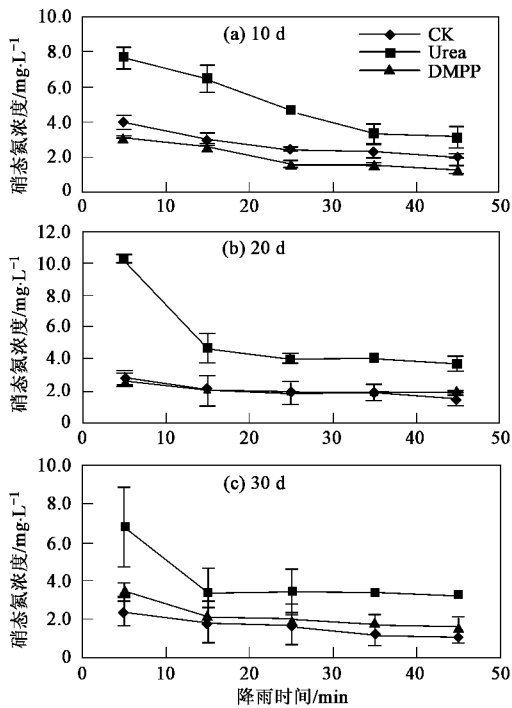


图 2 DMPP 对土壤硝态氮径流损失的动态影响

Fig.2 Effect of DMPP on nitrate-N runoff loss

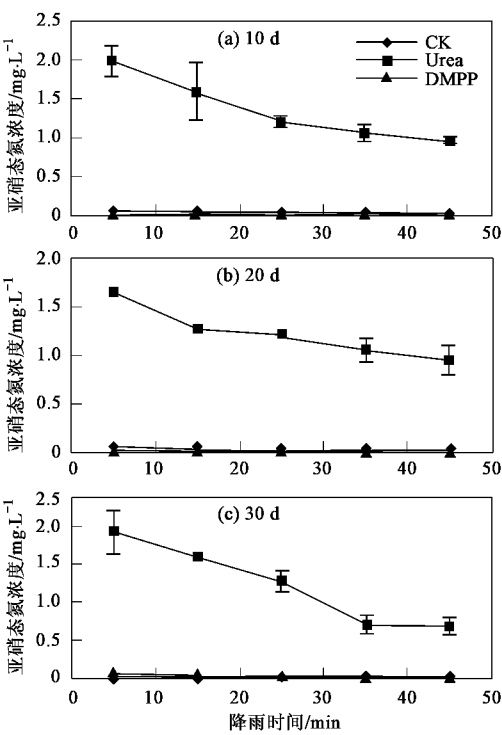


图3 DMPP对土壤亚硝态氮径流损失的动态影响

Fig.3 Effect of DMPP on nitrite-N runoff loss

表2 模拟降雨氮素含量形态分析								
Table 2 Nitrogen form analyses in the simulated rainfall runoff water								
时间 /d	处理	铵态氮 /mg·L ⁻¹	硝态氮 /mg·L ⁻¹	亚硝态氮 /mg·L ⁻¹	无机氮 /mg·L ⁻¹	铵态氮/无机氮 /%	硝态氮/无机氮 /%	亚硝态氮/无机氮 /%
10	CK	0.46	1.93	0.02	2.41	19.1	80.2	0.7
	Urea	3.17	5.24	1.57	9.98	31.7	52.5	15.7
	DMPP	4.51	1.56	0.02	6.09	74.0	25.7	0.3
20	CK	0.22	1.87	0.04	2.12	10.3	87.8	1.9
	Urea	0.60	5.16	1.28	7.05	8.5	73.3	18.2
	DMPP	1.69	2.08	0.12	3.89	43.4	53.4	3.2
30	CK	0.26	1.77	0.05	2.09	12.6	85.0	2.4
	Urea	0.56	3.90	0.97	5.42	10.3	71.8	17.8
	DMPP	1.09	1.87	0.14	3.09	35.2	60.3	4.4

由于其对氨氧化作用的显著抑制,土壤持续保持较高的铵态氮和较低的硝态氮和亚硝态氮水平,导致前期径流液中铵态氮含量有所增加.而在后期,随着DMPP在土壤中缓慢分解转化,抑制剂的浓度逐渐发生下降,土壤中硝化细菌活动缓慢加强,开始逐渐产生一定量的硝态氮和亚硝态氮^[11,15,16],致使地表径流液硝态氮及亚硝态氮的含量有所增加.

图4为整个降雨历时阶段径流混合液中无机氮浓度的比较.在10、20和30 d的3次降雨过程中,不施肥处理无机氮的浓度分别为2.41、2.12和2.09 mg·L⁻¹,常规尿素处理无机氮的浓度分别为9.98、

增加.DMPP尿素处理的径流液中,仍以铵态氮和硝态氮为主,其中硝态氮的含量是铵态氮1.23倍,铵态氮输出减少,硝态氮输出增加,而亚硝态氮占有的比例仍为极低的水平.在第30 d降雨时,不施肥处理径流液中的氮素仍以硝态氮为主,常规尿素处理的径流液中,以硝态氮为主,其次是亚硝态氮和铵态氮,各种氮素形态所占的比例与第2次降雨相近.DMPP尿素处理的径流液中,硝态氮最高,其次是铵态氮,其中硝态氮的含量是铵态氮的1.71倍,亚硝态氮占有的比例与第2次降雨相近,仍为极低的水平.尿素添加DMPP抑制剂,3次模拟降雨地表径流液中铵态氮含量分别是常规尿素处理的1.42、2.82和1.95倍,硝态氮含量比常规尿素处理分别减少70.2%、59.7%和52.1%,亚硝态氮含量分别减少98.7%、90.6%和85.6%,说明尿素添加DMPP抑制剂会使施氮后地表径流液中铵态氮含量有所增加,但土壤中硝态氮和亚硝态氮的径流损失则显著降低.随着时间的延长,常规尿素由于土壤中氨氧化反应的不断进行,土壤中铵态氮含量下降,硝态氮及亚硝态氮含量增加,因此表现为径流液中铵态氮含量下降,硝态氮及亚硝态氮含量增加的趋势.DMPP尿素

7.05和5.42 mg·L⁻¹,DMPP尿素处理无机氮的浓度分别为6.09、3.89和3.09 mg·L⁻¹,施肥处理明显增

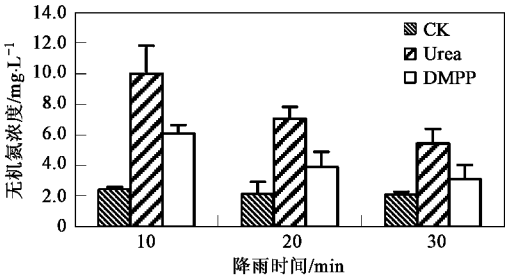


图4 DMPP对径流混合液中无机氮损失的影响

Fig.4 Effect of DMPP on inorganic-N runoff loss

加了无机氮的径流损失.从结果可以看出,DMPP 对抑制径流液无机氮损失有很好的作用,与常规尿素处理相比,DMPP 可使 3 次降雨径流液中无机氮浓度分别下降了 39.0%、44.8% 和 43.0%.

3 结论

(1) 尿素添加 DMPP 抑制剂,3 次模拟降雨地表径流液中铵态氮含量分别是常规尿素处理的 1.42、2.82 和 1.95 倍,会使施氮后地表径流液中铵态氮含量有所增加.

(2) 常规尿素的径流损失以硝态氮和铵态氮为主要形态,亚硝态氮损失也占总无机氮损失的 15.7%~18.2%,其对水环境有潜在的污染风险.使用硝化抑制剂 DMPP,与常规尿素相比,3 次模拟降雨地表径流液中硝态氮含量分别减少 70.2%、59.7% 和 52.1%,亚硝态氮含量分别减少 98.7%、90.6% 和 85.6%,可显著降低土壤中硝态氮和亚硝态氮的径流损失,尤其是亚硝态氮的径流损失接近于不施氮处理.

(3) DMPP 抑制剂在青紫泥土壤中对氮素具有显著的氨氧化抑制作用,与常规尿素相比,可减少 39.0%~44.8% 的无机氮径流损失.使用 DMPP 抑制剂有助于土壤氮素的保持,降低氮素向地表水体迁移的风险.

参考文献:

- [1] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科技出版社,1992. 32-58.
- [2] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考[J].生态环境,2003,12(2):192-197.
- [3] 金相灿.湖泊富营养化控制和管理技术[M].北京:化学工业出版社,2001. 52-54.
- [4] 孟伟,秦延文,郑丙辉,等.长江口水体中氮、磷含量及其化学耗氧量的分析[J].环境科学,2004,25(6):65-68.
- [5] 王小治,高人,朱建国,等.稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J].中国环境科学,2004,24(5):600-604.
- [6] Zhu J G, Liu G, Han Y, *et al.* Nitrate distribution and de-nitrification in the saturated zone of paddy field under rice/wheat rotation [J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 725-732.
- [7] Cho J Y. Seasonal runoff estimation of N and P in a paddy field of central Korea [J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2003, 65: 43-52.
- [8] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [9] Babiker I S, Mohamed M A A, Terao H, *et al.* Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable

- cultivation using geographical information system [J]. Environ Int, 2004, 29(8): 1009-1017.
- [10] Trenkel M. Improving fertilizer use efficiency controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture [M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997. 53-102.
- [11] 黄益宗,冯宗炜,王效科,等.硝化抑制剂在农业上应用的研究进展[J].土壤通报,2002,33(4):310-315.
- [12] Shen Q R, Ran W, Cao Z H. Mechanisms of nitrite accumulation occurring in soil nitrification [J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 747-753.
- [13] Amberger A. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook [J]. Commun Soil Sci Plan, 1989, 20: 1933-1995.
- [14] Gioacchini P, Nastri A, Marzadori C, *et al.* Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soil fertilized with urea [J]. Biol Fert Soils, 2002, 36: 129-135.
- [15] Serna M D, Banuls J, Quifiones A, *et al.* Evaluation of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate as a nitrification inhibitor in a citrus-cultivated soil [J]. Biol Fert Soils, 2000, 31(1): 41-46.
- [16] Zerulla W, Barth T, Dressel J, *et al.* 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate (DMPP)-a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture [J]. Biol Fert Soils, 2001, 34(2): 79-84.
- [17] 许超,吴良欢,冯涓,等.硝化抑制剂 DMPP 对菜园土壤铵态氮与硝态氮含量的影响[J].湖南农业大学学报,2003,29(5): 388-390.
- [18] 俞巧钢,陈英旭,张秋玲,等. DMPP 对氮素垂直迁移转化及淋溶损失的影响[J].环境科学,2007,28(4):813-818.
- [19] Roco M M, Blu R O. Evaluation of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate in two Chilean soils [J]. J Plant Nutr, 2006, 29(3): 521-534.
- [20] Chaves B, Opoku A, De Neve S, *et al.* Influence of DCD and DMPP on soil N dynamics after incorporation of vegetable crop residues [J]. Biol Fert Soils, 2006, 43: 62-68.
- [21] Yu Q, Chen Y, Ye X, *et al.* Evaluation of nitrification inhibitor 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns [J]. Chemosphere, 2007, 67(5): 872-878.
- [22] Yu Q, Chen Y, Ye X, *et al.* Influence of the DMPP (3, 4-dimethyl pyrazole phosphate) on nitrogen transformation and leaching in multi-layer soil columns [J]. Chemosphere, 2007, 69(5): 825-831.
- [23] Camargo J A, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment [J]. Environ Int, 2006, 32: 831-849.
- [24] Yu Q, Ye X, Chen Y, *et al.* Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen and soil salt-ion leaching [J]. J Environ Sci, 2008, 20(3): 304-308.
- [25] Xu C, Wu L H, Ju X T, *et al.* Role of nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethyl pyrazole phosphate) in NO_3^- -N accumulation in greengrocery (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) and vegetable soil [J]. J Environ Sci, 2005, 17(1): 81-83.
- [26] 杨丽霞,杨桂山,苑韶峰,等.不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J].环境科学,2007,28(8):1763-1769.